

## Пленарный доклад

УДК 629.7

**Поляхова Е.Н.**

### **ИДЕИ Ф.А. ЦАНДЕРА О КОСМИЧЕСКОМ ПОЛЁТЕ С СОЛНЕЧНЫМ ПАРУСОМ И СТОЛЕТИЕ ИХ ПОСЛЕДУЮЩЕГО РАЗВИТИЯ**

Недавно отечественная научная общественность отметила 130-летие со дня рождения одного из пионеров космонавтики и ракетодинамики, московского инженера Фридриха Артуровича Цандера (23 августа 1887 - 28 марта 1933). Хочется надеяться, что в этом аспекте данный обзор современного состояния отечественных проектов космоплавания окажется уместной и своевременной данью уважения к памяти выдающегося советского учёного.

Известно, что разработка инженерного проекта космического полёта с малой тягой металлического зеркала принадлежит именно Ф. А. Цандеру. Действительно, эта идея космоплавания впервые высказана им в 1910-1912 гг. как имеющая научный и инженерный смысл, тогда как ранее она появлялась лишь в нескольких произведениях научной фантастики на рубеже XIX и XX вв. Именно Цандер оказался первым, кто не только высказал идею, обосновав её научную достоверность и техническую возможность реализации, но и воплотил её в расчётный инженерный проект космического корабля с отражающим зеркалом в 1924 г. Проект был представлен им в виде двух рукописей, которые, впрочем, так и остались тогда неопубликованными. Они увидят свет только в 1961 г. Примерно тогда же появился и прижился краткий термин «солнечный парус» как удачное заимствование из зарубежной научной фантастики.

Догадки о возможности существования силы светового отталкивания высказывались ещё Иоганном Кеплером, который объяснял ею необычную форму кометных хвостов. Д. Максвеллу в 1873 г. удалось теоретически предсказать величину силы светового отталкивания и обосновать динамическую сущность светового давления как физического эффекта. Триумфальное решение этой проблемы принадлежит П.Н. Лебедеву, который впервые в 1899 г. блестящим экспериментом подтвердил существование этого эффекта, точно измерив его малую величину. В 1924 г. Ф.А. Цандер, базируясь на формулах и результатах лебедевского эксперимента, предлагает первый расчётный инженерный проект космического парусника с зеркальным парусом-экраном, выполненном из тончайшей металлической фольги. При жизни Ф.А. Цандера была издана

лишь незначительная часть его работ: статья «Перелёты на другие планеты», (1924 г., опубликована в журнале «Техника и жизнь», Вып. 13), статья «Реактивное движение», 1932 г. и небольшая монография «Проблемы полёта при помощи реактивных аппаратов», 1932 г. К счастью для космической науки сохранились некоторые его рукописи, конспекты и записки, хотя пропала рукопись его 500-страничной книги, подготовленной им к печати. Материалы Цандера [1-4] начали регулярно публиковаться, начиная с 1947 г., и к 1980 г. вышло пять разных изданий, полностью или частично содержащих его работы. Наиболее важной в смысле динамики космического полёта оказалось шестое издание трудов Цандера в 1988 г., под редакцией академика В.П. Мишина.

Опишем вкратце отечественную историю идеи Цандера за последующие сто лет. Одной из наиболее сложных проблем человечества на рубеже XX / XXI столетий оказалась проблема обеспечения энергией. Один из разумных путей экономии энергоресурсов в космосе состоит в освоении возобновляющихся, «вечных» источников энергии. Полёт в космосе под солнечным парусом – это реальное воплощение идеи полной или частичной замены энергии реактивных двигателей на «даровую» энергию солнечных лучей, давление которых на зеркальный отражающий парус способно создать хотя и малую, но вполне ощутимую силу тяги в космосе.

Основной залог эффективности паруса – высокая, близкая к единице, отражательная способность лёгкого плёночного зеркала, создающая высокую парусность всей конструкции. На уровне современных технических возможностей находится значение парусности, т.е. отношения «поверхность-масса», порядка  $100 \text{ м}^2/\text{кг}$ . Это позволяет достичь ускорения порядка  $0,001 \text{ м/с}^2$ , что только в шесть раз меньше гравитационного солнечного ускорения на орбите Земли. С 50-60-х гг. XX века бурное развитие парусной тематики сопровождалось интенсивным ростом числа публикаций в России и за рубежом. Описывались смелые проекты парусных перелётов к Луне, к Марсу и к комете Галлея, проекты освещения Земли из космоса с помощью зеркального паруса-осветителя на искусственном спутнике Земли (ИСЗ) и многие другие оригинальные технические идеи.

В настоящее время актуальными остаются решения следующих задач:

1. Построение методики расчёта главного вектора и главного момента светового давления на космический аппарат (КА) с парусом и на другие крупногабаритные светоотражающие космические конструкции, на которые оказывает существенное

влияние световое давление, учитывающей взаимное затенение элементов конструкции и вторичное отражение излучения между элементами конструкции.

2. Анализ влияния разогрева, деградации и деформации плёнки солнечного паруса при приближении к Солнцу, т.е. в области высоких температур и жёсткого радиационно-плазменного воздействия или вследствие сокращения полезной эффективной площади паруса из-за микрометеоритных пробоев.

3. Исследование возможностей КА с солнечным парусом для формирования так называемых некеплеровских орбит (цилиндрических орбит вне плоскости эклиптики), размещение КА в точках либрации светогравитационного поля Солнца.

Идеи полёта с малой тягой, появившиеся в 50-60-х гг. XX в., относились сначала только к электрореактивным двигателям (ЭРД) как двигательным установкам малой тяги. Базовые исследования этих траекторий принадлежат Д.Е. Охочимскому и его коллегам [5]. Прогресс в развитии средств бортовой энергетики, необходимость увеличения полезной нагрузки, сроков активного существования и эффективности межорбитальных манёвров обусловили расширение применения ЭРД на КА, в первую очередь на геостационарных ИСЗ связи. В последние 10-20 лет ЭРД интенсивно используются в качестве исполнительных органов систем управления движением. Современное состояние динамики полёта с применением ЭРД описано в [6, 7]. Солнечный парус как движитель малой тяги пока применяется очень ограниченно, хотя было несколько успешных проектов, прошедших испытание космосом. Парусные траектории могут служить практической альтернативой баллистическим траекториям полётов к Солнцу типа проекта «Интергелиозонд» [7, 8].

Мы не можем привести здесь полную парусную библиографию, начиная с первых лет публикаций и отсылаем читателя к ранним монографиям [9-13], полностью или частично посвященным парусным теориям тех лет и основам разработки концепций движения и управления КА с солнечными парусами. Что касается современных отечественных разработок, то мы упомянем некоторые научные школы, в которых на протяжении многих лет успешно разрабатывались парусные идеи. При этом мы напомним только фамилии руководителей этих школ, отдавая должное многолетним усилиям и успешным результатам их многочисленных коллег.

В качестве первой отечественной научной парусной школы необходимо упомянуть парусные работы в Институте прикладной математики АН СССР под руководством В.А. Егорова [14-19]. Интерес В.А. Егорова к теории космоплавания, по-видимому, вырос из его ранних базовых статей в соавторстве с В.В. Белецким. В них была дана теория

набора скорости КА с солнечным парусом в сфере действия планеты. С 1990 года В.А. Егоровым в соавторстве со многими учёными опубликовано более двух десятков работ по «парусной» тематике. Эти работы были неразрывно связаны с работами по влиянию светового давления на КА.

Мне хотелось бы назвать В.А. Егорова «крёстным отцом» моей книги «Космический полёт с солнечным парусом» [9]. В.А. Егоров был инициатором её издания, а позднее, стал её научным редактором. Издание 1986 г. было приурочено к 100-летию со дня рождения Цандера (1887-1933 гг.).

Отдельно хочется упомянуть В.И. Левантовского – великого энтузиаста космонавтики вообще и парусов - в частности. Во всех изданиях своей знаменитой книги «Механика космического полёта в элементарном изложении» [12] он неизменно комментирует цандеровские идеи полётов с солнечным парусом и их позднейшие разработки.

Второй отечественной школой солнечного паруса хочется считать школу Ленинградского, ныне Санкт-Петербургского университета. В разные годы авторы приведённых нами статей [9, 20-29] вместе со своими коллегами принимали участие в парусных разработках по полёту парусов с термическими ограничениями к Солнцу и по гравитационным манёврам КА с парусом у Венеры и Земли.

Ставились задачи исследования движения КА с солнечным парусом для создания широтной геосинхронной орбиты в плоскости, параллельной земному экватору, для разгрузки геостационарной орбиты (ГСО) и определения оптимального управления, необходимого для формирования такой орбиты. Фактически создавалась теория так называемых цилиндрических орбит. Из всего многообразия подобных орбит рассматривались ещё и гелиоцентрические полёты КА с парусом в сторону Солнца и построение внеэклиптической широтной орбиты, в пределе – орбиты зависания над полюсом Солнца. Рассматривалось и функционирование КА во внутренней первой коллинеарной точке либрации системы Солнце-Земля в фотогравитационном поле.

Третьей отечественной школой следует признать коллектив Самарского национального исследовательского университета имени академика С.П. Королёва [30-34, 53]. Наряду с оптимизацией движения КА с ЭРД здесь разрабатывается тема перелётов с малой тягой паруса с использованием одного или серии точечных гравитационных манёвров. Особое внимание в этой научной школе уделяется вопросам проектирования реальных КА и проблемам взаимосвязи динамики полёта, законов управления солнечным парусом и поведения элементов конструкции КА

с точки зрения устойчивости и прочности. Кроме того, в последнее время много внимания уделяется возможности применения солнечного паруса как дополнительного средства в мероприятиях для предотвращения астероидной опасности.

Выше мы упомянули три отечественные школы по космоплаванию, которые считаем стационарными в смысле их долговременного интереса к теоретическим исследованиям по парусам и многочисленными публикациями, в том числе и на международном уровне. Поскольку понятие научной школы недетерминировано, то мы просим извинения у сравнительно недавних участников парусной тематики, которые ещё не «оформились» в парусную школу, но уже находятся на перспективном уровне «цикла парусных работ». Возможно также, что и наша классификация парусных задач потребует кардинального пересмотра, когда появятся новые аспекты прикладного применения парусов. Это покажет будущее космоплавания.

Переходя от описания теоретических основ космоплавания к прикладным отечественным разработкам и проектам следует заметить, что прикладные исследования парусных проектов включали и посильную экспериментальную отработку работоспособности таких конструкций.

Перечислим их:

1. Широко известен космический эксперимент «Знамя» (1993 г.) – бескаркасная тонкоплёночная конструкция, стабилизированная вращением, работающая на орбите ИСЗ как осветитель земной поверхности [9, 22-24]. Отметим, что аналогичные проекты создавались ещё по крайней мере в течение 10 лет после запуска.

2. Разработка паруса лопастной конструкции (Космос-1) в 2000-е годы (полная площадь восьми треугольных лопастей паруса около 600 м<sup>2</sup>), представленной в [35-39]. Парус работал в релейном режиме (либо в полном раскрытии лопастей к потоку, либо лопасти повернуты все одновременно ребром к лучам).

3. Проект космического телескопа «Спектр РГ» [40] с высокими коэффициентами отражения разных частей КА, проект КА «Парус-МГТУ» с двумя лопастями (эксперименты по определению сил и моментов светового давления) [41-44].

4. Разработка проектов космических электростанций с применением тонкоплёночных трансформируемых парусных конструкций [45, 46].

5. Разработка орбитальных парусных конструкций для работы на околоземных орбитах, в том числе для перевода малых КА с одной орбиты на другую [47-49].

6. Проектирование вращающегося сплошного круглого солнечного паруса для перевода КА на ГСО [50-52].

Итак, мы представили только малую долю ссылок на недавние публикации по парусным прикладным проектам, которые представляются нам базовыми и перспективными. На самом деле мы имеем дело с обширными циклами работ коллективов многих авторов, связанных с тем или иным конкретным проектом. При этом солнечный парус выступает либо как маршевый двигатель малой тяги и объект оптимизации траектории межпланетного перелёта, либо как элемент системы управления ориентацией КА. В завершение обсуждения научного наследия Ф.А. Цандера по космоплаванию в отечественных публикациях, упомянем некоторые доклады, сделанные на конференции, одно из заседаний которой было посвящено 130-летию со дня рождения Ф.А. Цандера [28-30, 53-55].

### **Библиографический список**

1. Цандер Ф.А. Проблема полёта при помощи реактивных аппаратов. Сб. статей под ред. М. К. Тихонравова. М. Оборонгиз.- 1947. 237 с.
2. Цандер Ф.А. Об использовании силы давления света для полётов в межпланетном пространстве //«Проблемы полёта при помощи реактивных аппаратов. Межпланетные полёты». – 1961. – С. 361.
3. Tsander F.A. From a scientific heritage (Translation of «Iz nauchnogo naslediya») // NASA Technical Translation.– 1969.
4. Мишин В.П. Проблемы межпланетных полётов. – Наука, 1988.
5. Охоцимский Д.Е. и др. Прикладная небесная механика и управление движением.– 2010.– С. 328-367.
6. Графодатский О.С., Воронцов В.А., Крайнов А.М., Шаханов А.Е. Использование перспективных проектов автоматических космических аппаратов для решения задач пилотируемого освоения Луны В сборнике: Актуальные вопросы проектирования автоматических космических аппаратов для фундаментальных и прикладных научных исследований / АО «НПО Лавочкина», Составитель В.В. Ефанов. 2017. С. 28-36.
7. Константинов М.С., Петухов В.Г., Тейн М. Оптимизация траекторий космических аппаратов. М. МАИ. Серия: Научная библиотека. 2015. 260 с.
8. Кузнецов В.Д. Достижения и перспективы космических исследований Солнца // Успехи физических наук. – 2015. – Т. 185. – №. 6. – С. 664-672.
9. Поляхова Е.Н. Космический полёт с солнечным парусом. Под ред. В.А. Егорова. М. Наука. 1986. 304 с.; 2-е изд., доп., М. Изд. дом "Либроком" (URSS). 2011. 320 с, 3-изд., стер.: Книжный дом. «Либроком» (URSS). 2018. 320 с.

10. Васильев Л.А. Определение давления света на космические летательные аппараты // М.: Машиностроение. – 1985.
11. Джуманалиев Н.Д., Киселев М.И. Введение в прикладную радиационную небесную механику. Фрунзе. Изд-во Илим. 1986. 201 с.
12. Левантовский В.И. Механика космического полёта в элементарном изложении.– Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1980.
13. Белецкий В.В. Очерки о движении космических тел. – URSS, 2009.
14. Смирнов В.В., Егоров В.А., Сазонов В.В. Построение траекторий геоцентрического разгона космического аппарата с солнечным парусом. Космические исследования. 1993. т.31. Вып.3. с. 74-90.
15. Смирнов В.В., Егоров В.А., Сазонов В.В. Траектории геоцентрического разгона космического аппарата с неидеальным солнечным парусом. Космические исследования. 1993. т. 31. Вып. 5. с. 53-62.
16. Смирнов В.В., Егоров В.А., Сазонов В.В. Оптимизация пертурбационного маневра космического аппарата с солнечным парусом вблизи Луны в задаче геоцентрического разгона. Космические исследования. 1993. Т. 31. Вып. 6. С. 31-38.
17. Егоров М.А., Егоров В.А., Сазонов В.В. Управление элементами орбиты спутника-осветителя. Космические исследования. 1995. т. 33. N 2. с. 220-224.
18. Егоров М.А., Егоров В.А., Сазонов В.В. Оптимизация геоцентрического разгона космического аппарата с солнечным парусом при ограничении на угловую скорость паруса. Космические исследования. М. 1995. Т. 33. N. 6. С. 652-657.
19. Сазонов В.В., Сазонов В.В. Расчёт главного вектора и главного момента сил светового давления, действующих на космический аппарат с солнечным парусом. Космические исследования. М. 2011. Т. 49. Вып. 1. С. 59-67.
20. Kirpichnikov S.N. et al. Planar heliocentric roto-translatory motion of a spacecraft with a solar sail of complex shape // Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy. – 1995. – Т. 63. – №. 3-4. – С. 255-269.
21. Koblik V.V. et al. Controlled solar sailing transfer flights into near-sun orbits under restrictions on sail temperature // Cosmic Research.– 1996.– Т. 34.– №. 6.– С. 572-578.
22. Пережогин А.А. Реализация и развитие идей пионеров космонавтики по использованию солнечных парусов. Межд. Конфер. по механике «Четвертые Поляховские Чтения». Избранные Труды. СПб. СПбГУ. 2006. С. 674-683.
23. Поляхова Е.Н. Введение в теорию солнечного паруса. – 2010.

24. Поляхова Е.Н., Коблик В.В. Солнечный парус. Фантастика мечтателей или реальность космоплавания? М. «Ленанд» (URSS). 2016. 228 с.
25. Koblik V., Polyakhova E., Sokolov L. Controlled solar sail transfers into near-sun regions combined with planetary gravity-assist flybys // *Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy*. – 2003.– Т. 86.– №. 1.– С. 59-80.
26. Polyakhova E.N., Koblik V.V., Sokolov L.L. Solar Sail near the Sun: Point-like and Extended Models of Radiation Sources // *Advances in Space Research*.– 2011.– Т. 48. – №. 11.– С. 1717-1739.
27. Polyakhova E., Korolev V. The solar sail: Current state of the problem // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing, 2018.– Т. 1959.– №. 1.– С. 040014.
28. Polyakhova E., Shmyrov A., Shmyrov V. Solar radiation pressure application for orbital motion stabilization near the Sun-Earth collinear libration point // *AIP Conference Proceedings*. – AIP Publishing, 2018. – Т. 1959. – №. 1. – С. 040016.
29. Polyakhova E., Starkov V., Stepenko N. Flights of a spacecraft with a solar sail out of ecliptic plane // *AIP Conference Proceedings*.– AIP Publishing, 2018.– Т. 1959.– №. 1.– С. 040017.
30. Ишков С.А., Старинова О.Л. Оптимизация и моделирование движения КА с солнечным парусом. Известия Самарского научн. центра РАН. 2005. Т. 7. Вып. 1 (13). Самара. 2005.
31. Салмин В.В., Ишков С.А., Старинова О.Л. Методы решения вариационных задач механики космического полёта с малой тягой // Самара: Изд-во Самарского научн. центра РАН. – 2006.
32. Старинова О.Л. Расчёт межпланетных перелетов космических аппаратов с малой тягой // Самара: Изд-во Самарского научн. центра РАН.– 2007.
33. Старинова О.Л., Хабибуллин Р.М. Проектная модель малого метеорологического космического аппарата с солнечным парусом // *Известия Самарского научн. центра РАН*.– 2015.– Т. 17.– №. 2-1.
34. Николаева Е.А., Старинова О.Л. Моделирование систем защиты Земли от астероидной опасности // 15th International Conference «Aviation and Cosmonautics».– 2016. – С. 546-548.
35. Konstantinov M.S., Petukhov V.G. Orbital evolution of solar sail in problems of geocentric and lunar mission // *IAF, International Astronautical Congress, 52-nd, Toulouse, France*.– 2001.



36. Малышев В.В. и др. Анализ космических миссий для прямых исследований короны Солнца // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2001. – №. 4. – С. 131-152.
37. Бобылев А.В. и др. Экспериментальный полёт космического аппарата с солнечным парусом // Космические исследования. – 2003. – Т. 41. – №. 6. – С. 652-668.
38. Казмерчук П.В. Оптимизация траекторий с гравманеврами КА, оснащенных солнечным парусом роторного типа. Труды МАИ. 2006. Вып. 27. 12 с.
39. Малышев В.В., Усачов В.Е., Казмерчук П.В. Методика оптимизации траекторий, включающих гравманевры КА с солнечным парусом. Известия РАН. Серия: Теория и системы управления. 2007. Вып. 1. С. 194-205.
40. Шматов С.И., Мордвинкин А.С. Возмущающее воздействие солнечного излучения на космический аппарат «Спектр-РГ» на рабочей орбите // Вестник НПО им. Лавочкина. – 2013. – №. 5. – С. 21.
41. Неровный Н.А., Зимин В.Н. Об определении силы светового давления на солнечный парус с учетом зависимости оптических характеристик материала паруса от механических напряжений // Вестник Московского гос-го техн. ун-та им. Н.Э. Баумана. Серия «Машиностроение». – 2014. – №.3 (96).
42. Зимин В.Н., Неровный Н.А. Анализ влияния зависимости коэффициента отражения материала лопасти роторного солнечного паруса от механических напряжений на его деформированную форму // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2015. – №. 1 (658).
43. Неровный Н.А. Главный вектор и главный момент светового давления на оптически выпуклую космическую конструкцию // Вестник Санкт-Петербургского ун-та. Серия 1. Математика. Механика. Астрономия. – 2017. – Т. 4. – №. 1.
44. Зимин В.Н., Неровный Н.А. К расчёту роторного солнечного паруса // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. – 2017. – №. 2. – С. 93-99.
45. Райкунов Г.Г. и др. Центробежные бескаркасные крупногабаритные космические конструкции // Международный журнал экспериментального образования. – 2010. – №. 11. – С. 43-44.
46. Райкунов Г.Г., Комков В.А., Сысоев В.К., Мельников В.М. Космические солнечные электростанции - проблемы и перспективы. Под науч. ред. Г.Г. Райкунова. М. Российский Университет Дружбы Народов. 2017. 282 с.
47. Назиров Р.Р. и др. Управление группировкой космических аппаратов в окрестности Солнечно-Земных коллинеарных точек либрации с помощью солнечного паруса // Вестник машиностроения. – 2013. – №. 2. – С. 43-46.

48. Чумаченко Е.Н. и др. Управление космическими аппаратами с помощью солнечного излучения // Космические исследования.– 2014.– Т. 52.– №. 3.– С. 257-257.
49. Трофимов С.П. Динамически инвариантное масштабирование массогабаритных параметров каркасных парусных систем // Препринты Института прикладной математики им. МВ Келдыша РАН. – 2015. – №. 0. – С. 31-16.
51. Легостаев В.П. и др. Исследование динамики управляемого углового движения космического аппарата с вращающимся солнечным парусом // Труды МФТИ. – 2013. – Т. 5. – №. 2. – С. 106.
51. Зыков А.В. и др. Динамика вращающегося солнечного паруса в процессе его раскрытия // Прикладная математика и механика.– 2015.– Т. 79.– №. 1.– С. 48-60.
52. Богданов К.А. и др. Задачи управления движением космического аппарата с вращающимся солнечным парусом: монография, под ред. С.Н. Тимакова, Королев, РКК «Энергия» им. С. – 2016.
53. Petukhov V.G. Optimal heliocentric trajectories for solar sail with minimum area // AIP Conference Proceedings.– AIP Publishing, 2018.– Т. 1959.– №. 1.– С. 040013.
54. Starinova O.L., Rozhkov M.A., Gorbunova I.V. Sunlight reflection off the spacecraft with a solar sail on the surface of Mars // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2018. – Т. 1959. – №. 1. – С. 040020.
55. Polyakhova E.N., Ovchinnikov M.Y., Tikhonov A.A. To 130-th birthday anniversary of Friedrich Tsander (1887-1933): Ten new Russian books in Astrodynamics as the honorable contribution to his memory //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing, 2018. – Т. 1959.– №. 1.– С. 040015.